

# ***Chapitre II : Les contrôles non destructif***

---

## **II.1.Introduction :**

Dans l'industrie, les exigences de fiabilité, de réduction des coûts et de sécurité deviennent de plus en plus contraignantes. Au niveau de la production, il faut dimensionner les pièces au plus juste tout en garantissant leurs disponibilités et leurs performances.

Durant l'exploitation d'un produit industriel, son maintien en état de marche dans de bonnes conditions de sécurité nécessite une bonne connaissance de l'évolution des pièces qui le constitue. Cette connaissance implique en particulier de réaliser des contrôles ne portant pas atteinte à l'intégrité des pièces et en entravant le moins possible la disponibilité du produit. Ceci justifie l'importance croissante que prend le contrôle non destructif (CND) [27] [28] .

Les applications générales de la méthode CND sont la détection de défauts, la mesure d'épaisseur et l'identification de métaux et des alliages.

Des exemples spécifiques dans les industries de métaux sont l'inspection de tubes ou de barres lors de leurs fabrications. La méthode est aussi utilisée dans le domaine de l'aéronautique (détection de fissures), de l'évaluation des dommages par la chaleur et la détection de couches de corrosion cachées [29].

On distingue diverses techniques [30, 31, 32] dont principalement :

- Les ultrasons,
- Les rayons X ou Gamma,
- Le ressuage ou la thermographie infrarouge,
- La magnétoscopie,
- Les courants de Foucault.

Le choix de l'une d'entre elles dans une application est basé par la nécessité que les propriétés de la pièce à contrôler soient compatibles avec le phénomène physique mis en jeu [33].

Le CND, repose sur un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures industrielles, sans les abîmer, soit au cours de la production soit en cours d'utilisation.

Il faut donc choisir, pour chaque opération de contrôle, la méthode adéquate en fonction du type de défaut, des caractéristiques de la pièce, des conditions de mise en œuvre [34].

### **II.2.Les contrôles non destructifs :**

#### **II.2.1.Introduction :**

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Celui-ci correspond à la détection et la caractérisation des différents défauts et imperfections qui menacent la sécurité de fonctionnement des Systèmes soumis à des contraintes mécaniques, thermiques ou chimiques.

Aujourd'hui, on assiste à une demande très importante et généralisée, émanant de tous les secteurs industriels comme l'industrie automobile, aéronautique, pétrolière, navale et nucléaire. La qualité est devenue une nécessité vitale pour les entreprises confrontées à la concurrence internationale et à une clientèle exigeante, cette étape du processus industriel est destinée à garantir la sécurité d'utilisation des pièces contrôlées, elle joue un rôle économique non négligeable, dans le sens où elle permet une gestion optimisée de la maintenance [35].

Le CND constitue un secteur spécifique d'activité scientifique et industrielle possédant ses propres structures professionnelles qui regroupent des industriels fabricants et des organismes d'étude et de recherche. Vu l'étendu du champ d'application du CND, de nombreuses techniques ont été développées et étudiées pour l'inspection et la détection des défauts pour différentes applications industrielles [36] [37] [38],

Cette procédure de contrôle se produit souvent soit en cours de fabrication ou au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants [39] :

La reproductibilité : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

La fiabilité : le contrôle doit remplir son cahier de charges, il doit détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter.

la possibilité d'inspection globale et locale : il s'agit de la manière dont l'inspection est réalisée. Soit la technique permet l'inspection de l'ensemble de la pièce à la fois, on parle d'une inspection globale, ou juste d'une partie de celle-ci, ce sera alors une inspection locale.

la sensibilité : il s'agit du rapport entre la variation de la mesure et la grandeur que l'on veut mesurer. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations de la grandeur mesurée sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

La rapidité d'exécution : il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant au niveau des coûts et qu'il puisse s'intégrer dans un cycle de production.

Le coût : le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable qui doit être minimisé dans la mesure du possible. La résolution : la résolution est la plus petite variation du signal pouvant être détectée, par exemple la dimension du plus petit défaut. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite.

### **II.2.2. Historique :**

Comme l'instrumentation scientifique, le contrôle non destructif constitue un champ d'application privilégié des découvertes de la physique. Ce n'est toutefois qu'à partir de la seconde guerre mondiale que les techniques du CND ont pris leur essor dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie : contrôle des aciers, radiographie des soudures.

Une vigoureuse accélération du progrès et du développement des CND s'est manifestée ensuite vers les années 1960/1970 avec le développement rapide de secteurs très demandeurs tels que l'industrie automobile, l'aéronautique civile et le génie des centrales électriques nucléaires. Les dernières décennies enfin, voient l'émergence des techniques de CND qui ne pouvaient pas être mises en œuvre sans l'apport d'une électronique intégrée et d'une informatique puissante ; on assiste ainsi au développement rapide dans les contrôles entièrement automatiques et à l'essor des techniques gourmandes en traitement informatique [35,36],

Globalement, en tant qu'outil majeur de la politique de qualité d'une entreprise, les techniques de CND continueront à élargir leur champ d'application vers de nouveaux secteurs d'activité économique. On constate aussi que l'objectif du contrôle non destructif évolue, il ne suffit plus aujourd'hui de détecter un défaut, il faut aussi le localiser et le caractériser.

Il faut aussi imaginer des techniques et procédés non destructifs aptes à mettre en évidence des hétérogénéités physiques complexes ou irrégularités de propriétés telles que, par exemple, des variations de microstructure dans les composites, des variations de texture ou de rugosité sur une surface, des variations de propriétés électromagnétiques sur une bande.

Ces objectifs sont souvent difficiles à atteindre car les lois de la physique sont ce qu'elles sont et aussi, dans ce domaine, les progrès sont lents. Il n'en va pas de même l'automatisation des CND qui bénéficie pleinement des progrès de l'informatique ; il en résulte l'arrivée sur le marché, d'année en année, d'appareillages plus performants, plus fiables et surtout plus faciles à utiliser dans le cadre du respect de procédures de contrôles très strictes.

L'évolution des CND doit prendre toutefois en compte l'aspect coût, ce dernier pouvant freiner l'essor de nouvelles techniques très performantes [35].

### II.3 Différentes techniques du CND :

Les techniques non destructives doivent s'adapter aux matériaux que nous souhaitons contrôler. Dans le cas des métaux, et pour un contrôle au sein du métal, il faut exploiter les phénomènes physiques qui permettent de pénétrer dans le métal et sélectionner celui qui permet le mieux de fournir les informations requises par l'utilisateur. Actuellement, pour la plupart des métaux, il existe différents moyens de pénétrer au sein de la matière.

Il existe plusieurs techniques de CND, elles peuvent être classées comme suit :

#### II.3.1. Examen visuel :

L'inspection visuelle est la plus ancienne procédure de contrôles non destructifs. Il peut être aidé, par un éclairage classique ou laser. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité.

Les résultats prospères ont dépendu de la compétence de l'opérateur, le bon nettoyage, illumination adéquate de la zone inspecté et la qualité de l'instrument optique. Ces facteurs sont encore importants aujourd'hui, mais le matériel est devenu beaucoup plus sophistiqué. Habituellement, l'inspection visuelle ne peut pas être utilisée pour vérifier des résultats de test, ni ce peut être utilisé pour remplacer d'autres méthodes de CND [40, 41,42, 43].

##### II.3.1.1.Principe :

L'examen visuel est le plus simple et le premier des procédés de contrôle et il doit précéder tout autre type d'investigation. Il consiste à examiner à l'œil nu dans des conditions d'éclairage satisfaisantes et à distance appropriée de la surface des métaux, des soudures et des équipements. il peut être complété par l'utilisation de moyens optiques : loupe, binoculaire, endoscope... et de jauges ou moyens de mesure (pied à coulisse...)

##### II.3.1.2.Domaine d'application :

Contrôle des soudures : l'examen visuel permet d'une part, de déceler des défauts de forme et autres défauts débouchant en surface des joints soudés, d'autre part, de fournir les indications (aspect de métal, largeur des cordons, inclinaison des stries...) qui renseignent l'observateur sur les conditions dans lesquelles la soudure a été exécutée, et par la suite sur la probabilité de l'existence de défauts internes.

Il est le préliminaire indispensable à tous les examens conventionnels de surface (ressuage, magnétoscopie...) et de compacité (radiographie et ultrasons...).Le contrôle visuel est souvent complété par des mesures réalisées à l'aide de jauges spécifiques comme par exemple :

La mesure de la hauteur de gorge d'une soudure d'angle.

La valeur du bombé du cordon.

Les dimensions d'un cordon soudé.

Les défauts d'alignement, o Les dimensions d'un chanfrein.

Le contrôle visuel peut aussi être effectué en cours du procès (soudage, emboutissage...) ou immédiatement après à l'aide de caméra vidéo, le procédé est assez facilement automatisable, ce qui autorise la tri automatique entre les pièces bonnes et mauvaises. Le contrôle d'équipement : L'examen visuel est souvent le premier contrôle qui permet de repérer :

- L'absence d'une soudure ou d'un accessoire.
- Une fuite ou une zone de surchauffe.
- Une déformation anormale.
- La détérioration d'un revêtement.

### II.3.1.3. Avantages

- Examen simple, rapide et pas coûteux;
- Souplesse d'inspection.

### II.3.1.4. Inconvénients

- ✓ Détection limitée aux défauts superficiels;
- ✓ La surface doit être propre;

Pas d'interruption des parcours optiques entre l'œil et la pièce examinée.



**Figure II.1** : Examen visuel.

### **II.3.2. Le ressuage :**

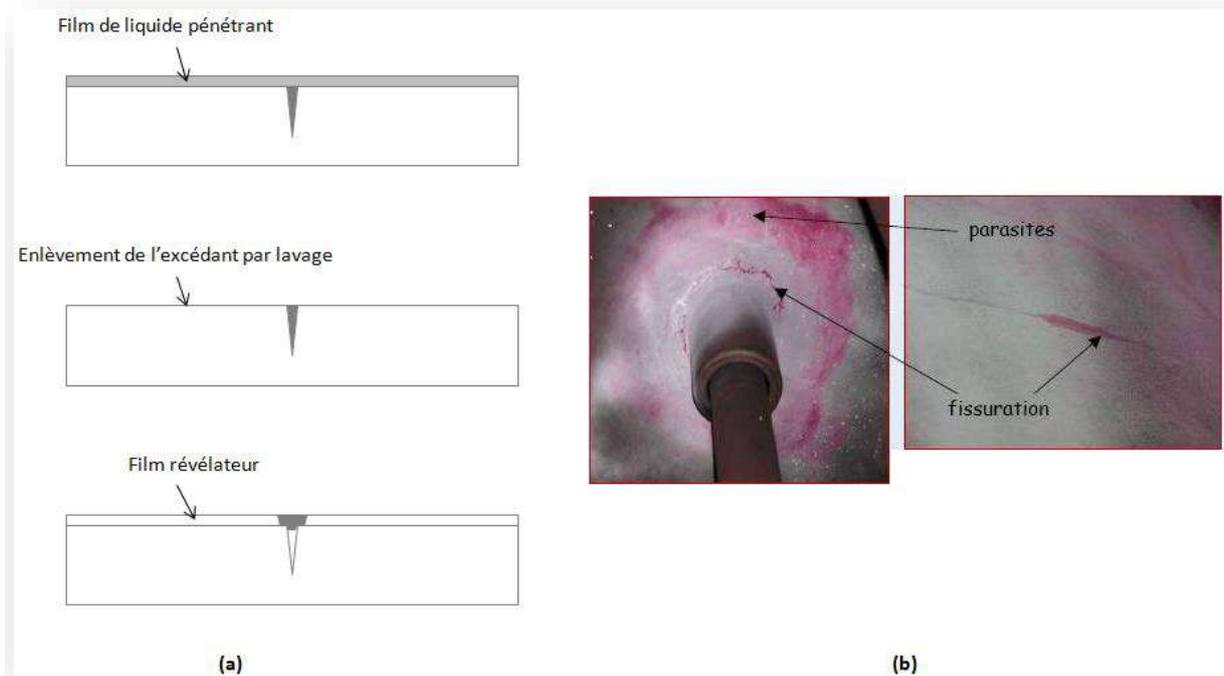
Le ressuage est un moyen de recherche des défauts superficiels qui consiste en l'amélioration de l'inspection visuelle de défektivité. Cet essai permet de déceler les défauts qui apparaissent à la surface. Il est appliqué dans le cas des matériaux non magnétiques (alliages à base d'Al, de Cu, de Ti, aciers inoxydables, etc.).

Son mode d'emploi est très simple. Il consiste à l'aspiration du pénétrant par la couche poudreuse du révélateur, le mécanisme de révélation des défauts par ressuage correspond aux quatre phases, application du pénétrant suivie d'un temps d'imprégnation, élimination de l'excès du pénétrant sur la surface de la pièce, ressuage du pénétrant par disposition d'une couche de « révélateur » sur la surface. L'image des défauts apparaîtra à l'observateur dans la mesure où l'étalement du pénétrant sur le révélateur conduit à une nette variation de couleur ou de luminance [44, 45,38].

#### **II.3.2.1. Principe :**

Le ressuage consiste à appliquer sur une surface à contrôler préalablement nettoyée, un pénétrant coloré ou fluorescent qui va pénétrer par capillarité dans des défauts débouchant

- a) après un temps d'imprégnation de 15 à 20 min à température ambiante, l'excès de pénétrant est éliminé par lavage.
- b) Après séchage, un révélateur blanc est appliqué sur la surface à contrôler.
- c) Le pénétrant contenu dans les défauts éventuels ressué alors dans le révélateur.
- d) Les images des défauts apparaissent immédiatement ou jusqu'à 30 min après l'application du révélateur.



**Figure II.2:** Etapes du contrôle par ressuage.

### **II.3.2.2. Domaine d'application :**

Le ressuage permet de détecter les défauts de compacité débouchant en surface sur des métaux non poreux. Le ressuage est utilisé pour le contrôle :

- Des pièces moulées et forgées.
- Après rectification et/ou traitement thermique des pièces mécaniques. Sur produits laminés ou étirés.

En service.

Les fissures de fatigue ou de corrosion peuvent si les conditions sont favorables être mise en évidence par ressuage.

Pendant le soudage, il peut être mis en œuvre par exemple :

Lors d'une reprise envers pour s'assurer l'élimination complète de défauts pouvant subsister à la racine du joint (manque de pénétration, fissures....).

Entre passes, dans ce cas, le contrôle peut être effectué après la première passe, puis toutes les passes ou toutes les trois passes par exemple (température < 200°C).

Après soudage, il permet la détection des défauts suivants pourvu qu'ils débouchent à la surface : fissures, piquûres, retassures et certains manques de fusion.

### II.3.2.3. Avantages :

- Facile à mettre en œuvre manuellement sur chantier.
- Insensible à l'orientation des défauts par rapport à la surface
- Détection possible de petits défauts capables de générer des fuites.
- Possibilité de lignes automatisées de contrôle.
- Utilisable sur des métaux non ferromagnétiques pour lesquelles les contrôles magnétoscopiques sont inefficaces.
- Utilisable sur des ferromagnétiques lorsque les problèmes de désaimantation sont critiques ou lorsque les pièces présentent une géométrie trop complexe.

### II.3.2.4. Inconvénients du contrôle par ressuage :

- Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués.
- Nettoyage rigoureux des pièces à contrôler.
- Les opérateurs doivent être expérimentés pour certaines techniques.
- Produits inflammables, volatils et nocifs.
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout.

### II.3.3. La magnétoscopie :

Appliquée exclusivement sur des matériaux ferromagnétiques (fer, acier, fonte, ...), la magnétoscopie est une méthode de contrôle non destructif qui permet de détecter des discontinuités débouchant en surface ou sous-cutanées. Comparée au ressuage, elle est donc plus restrictive mais elle lui est préférée, quand elle est applicable, car elle est beaucoup plus rapide [46,47]. La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler, ou une partie de celle-ci, à l'aide d'un champ magnétique constant et suffisamment élevé Figure II.3.

L'existence de discontinuités de surface ou sous-jacentes provoquent une distorsion des lignes de force du champ magnétique qui génère des flux de fuite. Ces flux sont mis en évidence par des révélateurs magnétiques micronisés et déposés sur la surface de la pièce, en attirant les particules du révélateur, les flux de fuite fournissent des signatures particulières des discontinuités.

Cependant, une meilleure détection n'est obtenue que si les discontinuités se situent perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique. Pour détecter toutes les discontinuités à la surface d'une pièce, il faut effectuer deux aimantations orthogonales l'une par rapport à l'autre.

### II.3.3.1.Principe

La magnétoscopie consiste à soumettre une zone à contrôler à l'action d'un champ magnétique continu ou alternatif, les défauts éventuels engendrent un champ de fuite à surface de la pièce, le champ de fuite est matérialisé par une poudre ferromagnétique très fine pulvérisée sur la surface à examiner et attirée au droit du défaut par des forces magnétiques existe de nombreux moyens d'aimantation et de produits adaptés à :

La forme de la pièce.

L'orientation du défaut



### II.3.3.2 Domaine d'application.

**Figure II.3 :** Principe de la magnétoscopie

La magnétoscopie permet de détecter des défauts de compacité débouchant en surface ou proche de la surface sur des métaux ferromagnétiques tels que les aciers, fontes, nickel, cobalt . . .

La magnétoscopie est utilisé pour le contrôle :

Des pièces moulées : criques dans les congés de raccordement et réseaux de fissures superficielle.

Des pièces forgées : criques correspondants à des déchirures superficielles, tapures ou fissures survenant au refroidissement, retassures comportant des fissures de décohésion.

Après traitement thermique.

En service : les fissures de fatigue peuvent si les conditions sont favorables être détecter, les fissures de corrosion sous tension sont généralement bien décelées ainsi que les fissures d'origine thermique.

Des soudures :

Avant soudage : elle peut être utilisée par exemple pour effectuer un contrôle des faces des chanfreins de soudure.

Pendant soudage : elle peut être mise en œuvre par exemple, lors d'une reprise envers pour assurer l'élimination complète de défauts pouvant rester à la racine du joint (manque de pénétration, fissures ...).

Après soudage: elle permet la détection des " défauts " superficiels ou sous-jacent comme par exemple, fissures, retassures de cratères, manque de pénétration sur chanfreins en X, manque de fusion situé entre le métal de base et au voisinage des raccordements.

### II.3.3.3. Avantages du contrôle par magnétoscopie:

- Facile à mettre en œuvre manuellement sur chantier Economique. Résultats quasi immédiats.
- Détection des défauts débouchant matés ou bouchés des défauts sous adjacent

### II.3.3.4. Inconvénients du contrôle par magnétoscopie :

- Contrôle exclusivement réservé aux matériaux ferromagnétiques.
- Impossibilité de détecter des défauts en profondeur ( $> 2$  mm de profondeur).
- Les opérateurs doivent être formés et expérimentés
- Risque d'interprétation d'images fallacieuses (sur filetage de vis par exemple)
- Risque électrique par passage direct de courant.
- Risque de micro fissuration sur certains aciers sensibles.
- Démagnétisation obligatoire après contrôle.
- Limitation du contrôle pour les grandes dimensions de pièces.

### II.4.4. Les courants de Foucault:

#### II.4.4.1. Principe:

Les courants de Foucault autorisent le contrôle de compacité des métaux conducteurs de l'électricité. La profondeur de contrôle dépend des caractéristiques magnétiques et électriques du matériau à contrôler (de quelque dixième de millimètre pour l'acier à plusieurs millimètres pour le titane) et de la fréquence de la sonde utilisée. Le contrôle consiste à comparer les signaux observés lors du déplacement de la sonde avec ceux générés par les défauts artificiels réalisés sur un bloc étalon et de même nuance [28]

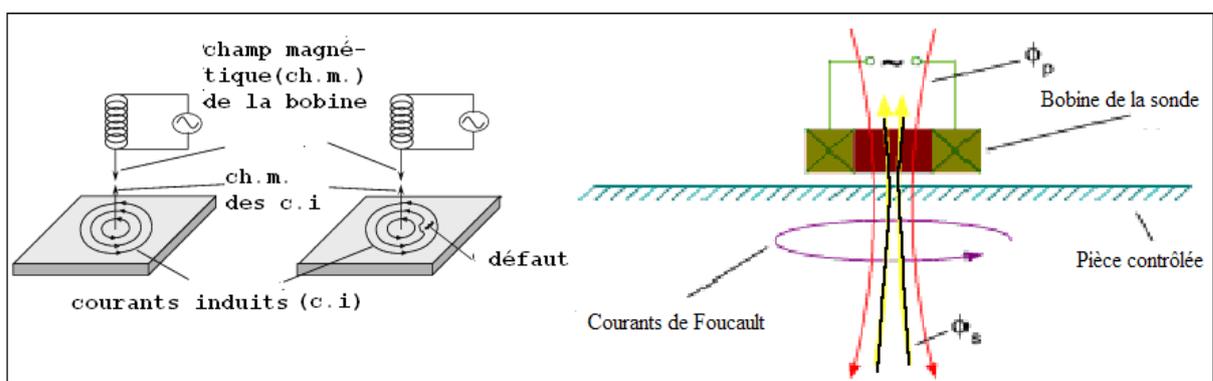


Figure II.4 : détection des défauts par les courants de Foucault.

### II.4.4.2. Domaine d'application:

Les techniques de contrôle utilisant les courants de Foucault sont utilisés pour effectuer les opérations suivantes.

- Tri de nuance.
- Détection des effets de la chaleur sur les alliages d'aluminium comme par exemple la surchauffe et recherche des fissures dans les structures aéronautiques.
- Vérification qu'un traitement thermique est effectif par estimation de la dureté du matériau et recherche d'endommagement d'un matériau revêtu.
- Mesure d'épaisseurs de revêtement (conducteur non magnétique sur substrat magnétique ou isolants sur substrat conducteur).
- Recherche des défauts sur produits en sortie de fabrication (tube, rails, barres ... ).
- Suivi d'installation et de matériels en service.
- Contrôle d'échangeurs tubulaires, condenseur ... de l'industrie nucléaire et de l'industrie chimique en vue de détecter des corrosions, érosions, chocs et fissures, dans les secteurs.

### II.4.4.3. Avantages :

- Le contrôle ne nécessite l'accès qu'à un seul côté de la pièce.
- Contrôle sans contact ni milieu de couplage de tous les métaux conducteurs.
- Contrôle possible à haute température (à plus de 900°C).
- Grande vitesse de contrôle (exemple: contrôle de fil défilant à 100 m/s).
- Réalisation de capteurs adaptés à une application particulière.
- Si requis, l'automatisation relativement facile de l'opération de contrôle.
- Alternative possible au ressuage ou à la magnétoscopie notamment pour la recherche des défauts en service lors des opérations de maintenance.

### II.5.5. Les ultrasons:

Le contrôle non destructif par ultrasons consiste à générer une onde ultrasonore qui se propage dans la pièce à contrôler par un transducteur piézoélectrique et analyser sa propagation. L'onde ultrasonore est réfléchiée par le fond de la pièce et par d'éventuelles discontinuités présentes dans le matériau. La localisation d'un défaut dans la profondeur de la pièce se fait grâce à la position de son écho obtenu sur écho gramme.

L'amplitude relative des différents échos peut renseigner sur l'importance du défaut. Toutefois, les anomalies de surface sont difficilement détectables. La méthode peut être appliquée à tous les matériaux qui ne présentent pas une très forte atténuation ni une anisotropie très importante à l'instar des matériaux métalliques, composites, céramiques etc. [48].

Elle offre une grande sensibilité de détection qui peut atteindre par exemple 1 mm à 0,2 mm dans le cas de l'acier, et permet la détection de défauts localisés dans le volume de pièces d'épaisseur importante,

### II.5.5.1. Principe:

Les ultrasons sont des ondes mécaniques générés à partir d'un élément piézoélectrique excité à une fréquence comprise pour de nombreuses applications entre 2 et 5 MHz, cet élément appelé le transducteur.

Les ultrasons sont transmis dans la pièce à contrôler par l'intermédiaire d'un milieu de couplage, et se propagent à une vitesse qui dépend du matériau. Lorsque les ultrasons rencontrent un défaut favorablement orienté par rapport à l'onde incidente, un écho revient vers le transducteur. Cette énergie mécanique réfléchie est transformée en signal électrique par l'élément piézoélectrique et se signale par un écho sur le système de visualisation de l'appareil à ultrason. La position de l'écho permet de déterminer la profondeur de l'indication dans la pièce et d'en apprécier le caractère volumique ou non volumique.

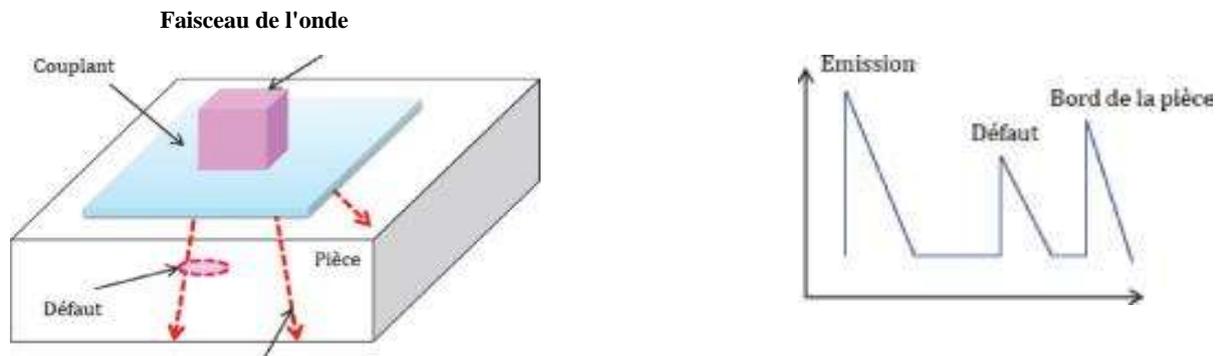


Figure II.5: Principe des ultrasons.

### II.5.5.2. Domaine d'application:

Le contrôle par ultrasons est applicable à de nombreux matériaux pourvu qu'ils ne présentent ni une trop forte atténuation ni une anisotropie importante. Les matériaux métallique, thermoplastiques, composites et céramiques peuvent être contrôlés par ce procédé. Les ultrasons permettent la détection de tous les défauts engendrant une variation locale des propriétés ultrasonores de la pièce. Le contrôle des soudures peut être effectué entre 20°C et 150°C. Il existe des solutions en dehors de cette gamme mais plus complexes à mettre en œuvre. Le contrôle ultrasonore est notamment utilisé pour le contrôle:

- Des pièces moulées : retassures, vermiculures, variations locales de structure, ségrégations et porosités.
- En service: les défauts apparaissent en service tels que fissures ou corrosions peuvent être détectés par ultrasons.
- Des soudures: avant et après traitement thermique le contrôle par ultrasons peut être appliqué avec profit aux soudures réalisées sur les aciers non alliés et faiblement alliés de nuance ferritique ainsi sur les alliages légers. Avant le soudage, il est nécessaire d'effectuer, dans le cas des tôles et des produits gorgés, un contrôle par ultrasons pour détecter des défauts pouvant gêner le contrôle après, soudage.

Pendant soudage, le contrôle ultrasonore peut être effectué mais il est délicat de mise en œuvre car le remplissage partiel de la soudure peut gêner le contrôle.

Après soudage, le contrôle ultrasonore est bien adapté pour le contrôle des épaisseurs soudées comprises entre 8 et 100 mm mais il est adaptable en dehors de cette fourchette. Grâce aux techniques d'examen mises en œuvre, tous les types de soudure peuvent être examinées (bout à bout, d'angle et à recouvrement).



**Figure II.6 :** Control par ultrasons des soudures

### II.5.5.3 Avantages :

- ❖ Accès nécessaire à un seul côté de la pièce.
- ❖ Très sensible pour la détection des défauts plans.
- ❖ Contrôle possible de compacité de la totalité d'un volume donné.
- ❖ Positionnement des indications détectées dans l'épaisseur.
- ❖ Estimation de l'importance d'une indication à l'aide de son pouvoir réfléchissant (contrôle en réflexion) ou de l'atténuation produite (contrôle en transmission).
- ❖ Automatisation et suivi possibles à l'aide de moyens d'imageries.

### II.5.5.4. Inconvénients :

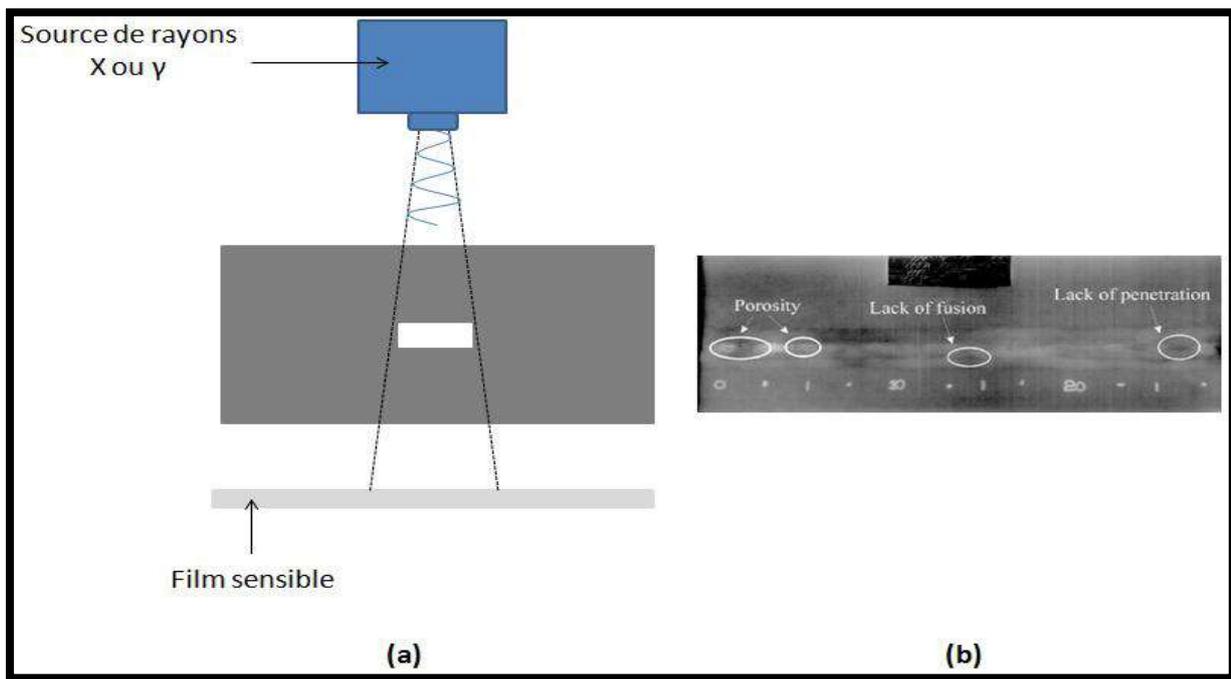
- ❖ Nécessité d'utiliser un milieu de couplage entre le palpeur et la pièce.
- ❖ Interprétation de la nature des défauts et de leur dimension délicate nécessitant un personnel qualifié.
- ❖ Mise en œuvre difficile sur certains matériaux (Fonte par exemple).
- ❖ Sensibilité fortement fonction de l'orientation du défaut vis à vis de la direction.

## II.6.6. Contrôle par radiographie :

La radiographie est une méthode couramment employée pour contrôler l'intérieur d'une pièce, il s'agit de traverser la matière à examiner par un rayon ionisant de très courte longueur d'onde, en franchissant la pièce, l'énergie des photons de ce rayon est partiellement absorbée par la matière rencontrée selon sa densité, un détecteur (film, écran...) est placé derrière la pièce et fournit un radiogramme de la zone traversée. Les défauts sont représentés dans cette image par une variation locale de l'intensité [28].

### II.6.6.1. Principe :

Les rayons X et gamma sont des ondes électromagnétiques de forte énergie, générés par des tubes à vide ou des éléments radioactifs (cobalt, Iridium ...), lorsqu'ils traversent la matière, les rayonnements subissent une absorption proportionnelle à l'épaisseur et à la masse volumique du milieu traversé. Le rayonnement émergent de l'objet à contrôler impressionnera le film radiographique qui, après développement par voie chimique, donnera une image en négatif de la pièce examinée. Le défaut sera d'autant mieux détecté qu'il présente une dimension importante dans la direction du rayonnement.



**Figure II.7 :** Illustration du fonctionnement de la radiographie (a) Principe de la radiographie ; (b) exemple d'image obtenue par radiographie [49]

### II.6.6.2. Domaine d'application :

Les rayonnements ionisants (X et gamma) sont applicables au contrôle de la majorité des matériaux métalliques usuels dans leur état de base et qu'ils soient soudés d'une manière homogène ou hétérogène. Cette méthode est aussi applicable aux matériaux non

métalliques comme exemple les thermoplastiques. Le contrôle radiographique peut être exécuté à tous les stades de fabrication d'un appareil :

Avant soudage, en examinant les accessoires tel que vanne et robinetterie.

Pendant la fabrication, en examinant les soudures.

Après fabrication, l'appareil étant en service afin de détecter les éventuels dommages susceptibles de survenir en service.

La détection des défauts dépend principalement de leurs caractéristiques géométriques et/ou dimensionnelles, ainsi que de leur orientation par rapport à l'axe de rayonnement et de la sensibilité du système film utilisé. De ce fait, les défauts volumiques (cavités, inclusions,...) sont généralement bien détectés ainsi que les défauts plans d'ouverture suffisante et dont le plan principal est quasi parallèle à l'axe du rayonnement. La radiographie est applicable pour le contrôle des :

Pièces moulées : porosités gazeuse, retassures et fissures diverses, matières étrangères, inclusions de sable, ségrégations et inclusions d'oxydes.

Produits laminés et étirés : ségrégations et fissures liées au formage.

Soudure au stade de la fabrication : fissures, cavités, inclusions solides, manques de fusion et de pénétration, défauts de forme.

Défauts survenant en service dans les soudures ou dans le matériau de base, fissures de fatigue d'origine thermique ou mécanique, corrosions (piques, cavernes, fissures), érosions mécaniques (cavitations....) déformation suite à un choc.

### **II.6.6.3. Avantages :**

- Génère un document de contrôle archivable : le film radiographique qui peut être repris, étudié et discuté, longtemps après la prise initiale.
- Produit l'image de l'ombre portée du défaut, ce qui permet de mettre un nom sur ce dernier.
- Vérification de la mise en œuvre du procédé grâce à des Indicateurs de Qualité d'Image normalisés (IQI).
- Matériel robuste.
- Autonomie : la gammagraphie ne nécessite pas d'alimentation en courant électrique
- Possibilité d'exposition panoramique.
- Numérisation possible avec traitement d'image afin de renforcer la détection de défauts difficiles.

### **II.6.6.4. Inconvénients :**

- L'interprétation des images demande un niveau d'expertise de l'opérateur;
- Mise en œuvre des dispositifs et procédures de protection du personnel;

- Cette technique est extrêmement coûteuse et impose des conditions de sécurité
- Le risque de ne pas détecter les fissures se présentant selon l'axe du faisceau.

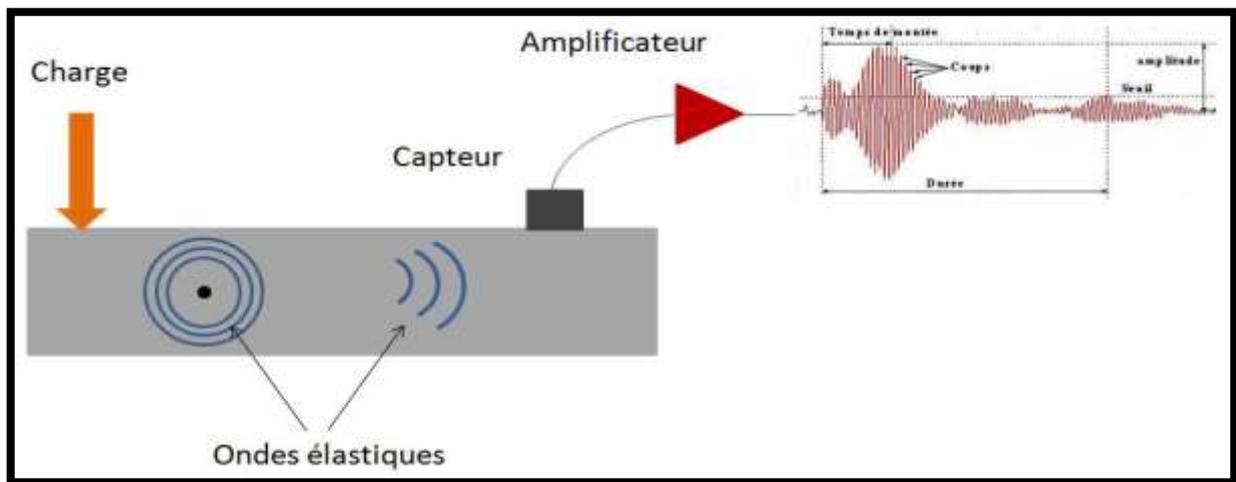
### II.7.7.L'émission acoustique :

#### II.7.7.1.Principe :

L'émission acoustique (EA) résulte d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau comportant une dégradation active ou se propageant sous l'effet d'une sollicitation externe, judicieusement choisie.

Différents phénomènes physiques peuvent être générateurs d'émission acoustique :

- Propagation de fissures.
- Déformation plastique.
- Relaxation de contraintes dans les soudures.
- Corrosion.
- Fuites (de liquide ou de gaz).



**Figure II.8 : Contrôle par émission acoustique [50].**

Le principe de mesure de l'émission acoustique réside dans la détection des ondes ultrasonores générées par l'activité de la structure. La détection est généralement réalisée par des capteurs de type piézoélectrique placés au contact de l'équipement. L'acquisition et le traitement des données enregistrées sont alors réalisés par le système antérieurement réalisé.

#### II.7.7.2. Domaine d'application:

La principale application industrielle de l'émission acoustique est le contrôle des équipements métalliques sous pression et des réservoirs de stockage. Ces équipements sont

en général, des structures de taille importante pour lesquelles un suivi périodique est réglementé. L'émission acoustique est aussi appliquée sur les métaux composites.

En effet, la requalification périodique ou la réception pour les équipements neufs, comporte une épreuve hydraulique souvent problématique (arrêt de production et maintenance, corrosion et surcharge pendant l'épreuve, ...). Le contrôle par émission acoustique est particulièrement adapté pour satisfaire à ces exigences réglementaires.

Le contrôle peut être réalisé aussi bien durant une épreuve hydraulique que pneumatique. Une surpression de 10% par rapport à la pression de service 'vue par l'appareil au cours des 6 derniers mois, permet d'obtenir des résultats d'EA décisifs. Dans certains cas un suivi en service (ou lors des changements de processus) peut suffire à évaluer l'intégrité d'un appareil.

Les capteurs EA classiques supportent des températures de l'ordre de 100°C. Si nécessaire, l'utilisation des capteurs à haute température permet de contrôler des structures jusqu'à quelques centaines de degrés.

Les principaux secteurs d'utilisation sont:

Le suivi d'épreuve hydraulique ou pneumatique d'équipement sous pression (sphère de stockage, réservoirs, réacteurs, chimiques, tuyauteries, condenseurs, échangeurs et réacteurs à paroi froid.

Le contrôle des bacs de stockage : la maintenance des fonds de bac de Stockage est une opération longue et coûteuse. Elle nécessite une vidange complète, un nettoyage et un examen du fond (la surface à contrôler, peut varier d'environ 100 m<sup>2</sup> à plus de 2000 m<sup>2</sup> suivant le diamètre du bac).

L'émission acoustique présente l'avantage d'évaluer l'état des fonds de bac sans aucune préparation préalable seule une interruption de service de 24 à 48 heures est nécessaire.

Ce contrôle a pour objet principal d'évaluer la présence de fuites et de corrosion active au niveau du fond de bac (durée d'écoute acoustique de 1 à 3 heures). Cette opération peut être réalisée avant les interventions de maintenance et permet d'évaluer les réparations à prévoir (dimensions et emplacement des tôles de fond à remplacer).

### **II.7.7.3. Les Avantages :**

- Suivi de l'évolution des sources d'émission acoustique sans interrompre l'exploitation de l'équipement concerné.
- Localisation des sources d'émission acoustique générées par des défauts de la structure.
- L'utilisation de l'émission acoustique lors du suivi des épreuves sur équipements sous pression présente les avantages évidents qui sont :
- L'évaluation de l'intégrité globale d'une structure.

- La possibilité de surveiller une structure, sans arrêt de processus où vidange âge ni démontage ou qui est inaccessible à des contrôles non destructifs conventionnels.

### II.8.8 Tomographie

Très utilisée dans le domaine médical, la tomographie est une technique d'imagerie qui permet de reconstruire le volume 3D d'un objet à partir d'une succession de coupes en 2D (réalisées grâce aux platines de rotation et de translation). Basée sur le principe de la radiographie (même source de rayonnement X ou  $\gamma$ ), cette méthode permet de mesurer des densités ou des dimensions, de rechercher des anomalies à l'intérieur des objets Figure II.9 ou bien encore d'examiner en temps réel des matériaux soumis à des contraintes [51]. Le principe de la tomographie est représenté Figure II.10.

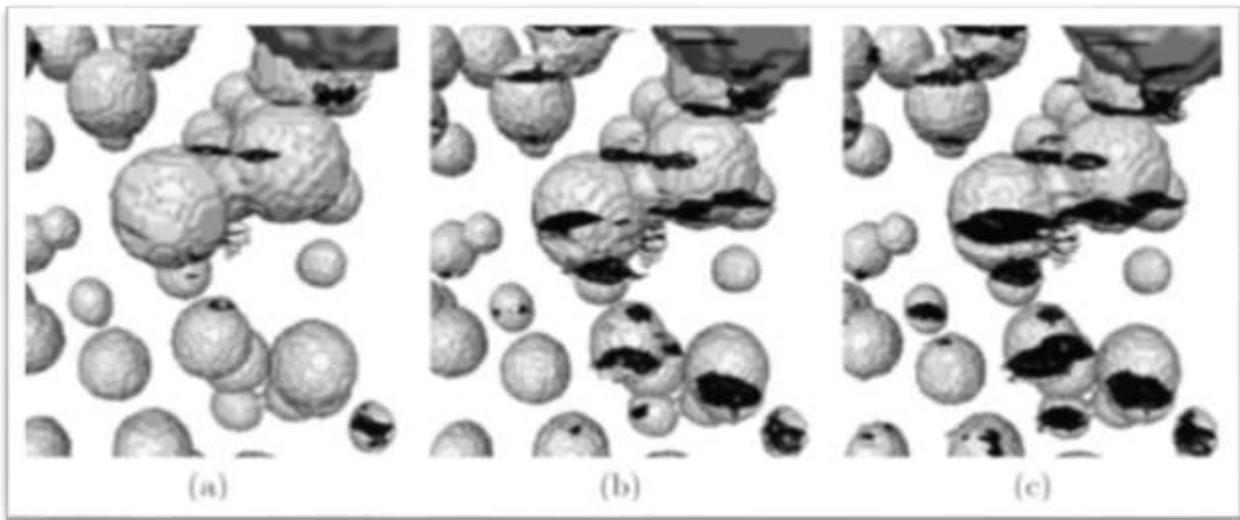


Figure II.9 : Exemple de visualisation tridimensionnelle de ruptures d'inclusions pour trois déformations

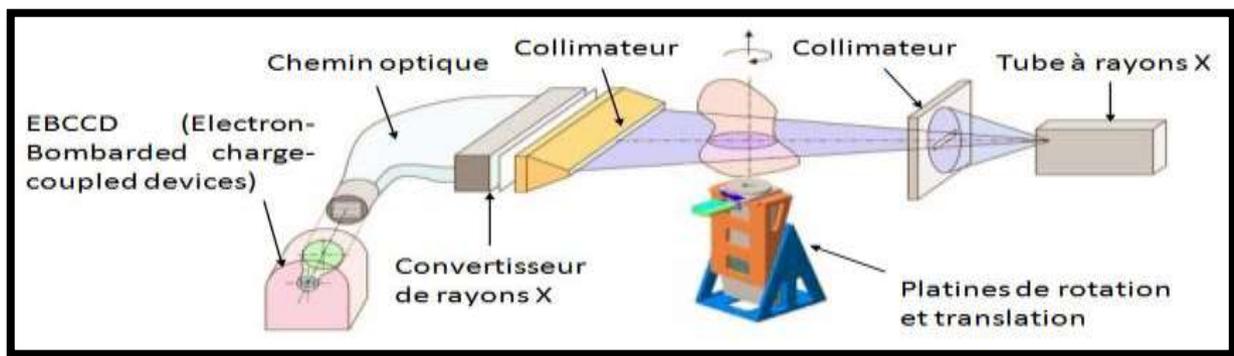


Figure II.10: Principe de la tomographie [52]

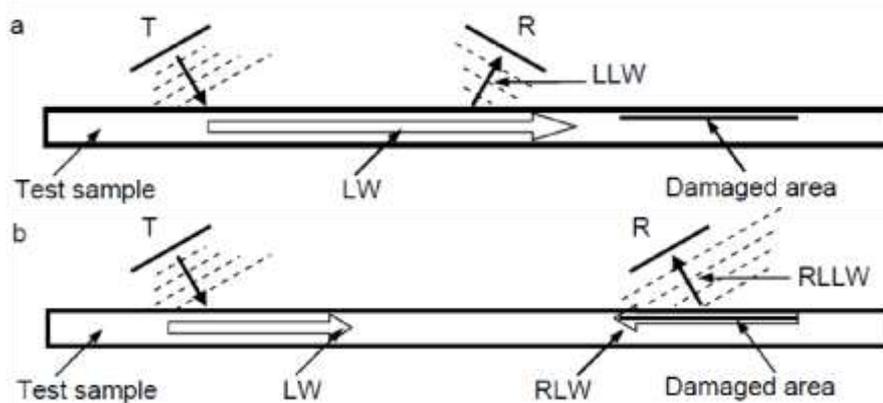
Cette méthode nécessite un équipement lourd ce qui entraîne un coût important d'installation et d'utilisation. La taille des pièces à inspecter est encore plus petite que la radiographie.

### II.9.9.Méthode de couplage à l'air

Dans les techniques ultrasonores conventionnelles, un couplant, en général de l'eau ou du gel, assure la transmission du signal ultrasonore. Le contrôle ultrasonore de structure en matériau composite peut alors s'avérer délicat en présence d'obstacles à la surface de la pièce. Afin de s'affranchir de ces contraintes géométriques, une solution consiste à utiliser un couplage à l'air.

#### II.9.9.1.Principe :

Le principe du couplage par l'air est basé notamment sur la mesure de variation de l'amplitude des ondes de Lamb à travers un matériau par le biais de transducteurs adaptés. Deux méthodes de fonctionnement se distinguent. La première configuration nécessite d'effectuer le contrôle en disposant les transducteurs en mode émetteur / récepteur (ou pitch / catch). Dans la seconde configuration, les transducteurs sont orientés dans la même direction, où le récepteur capte les ondes de Lamb diffusées et réfléchies par le défaut.[53]



**Figure II.11** : Principe de la méthode par couplage à l'air – a : méthode pitch and catch ; b : méthode de diffusion et réflexion. E : Emetteur ; R : Recepteur.[53]

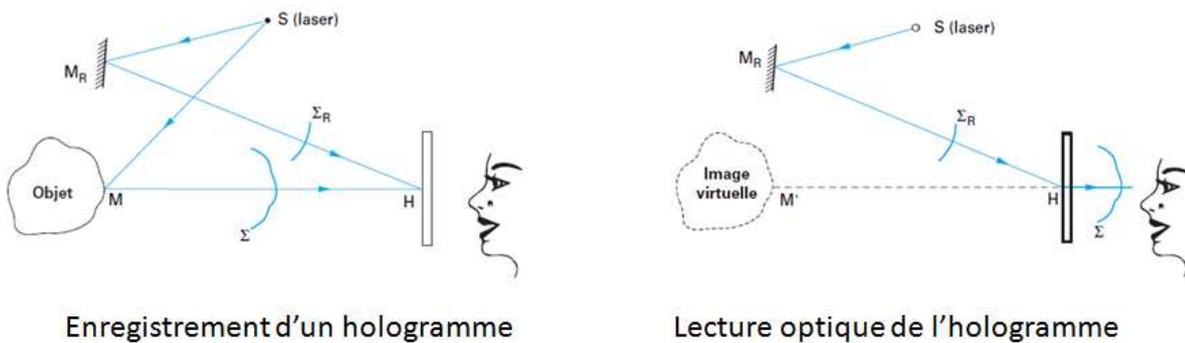
Cette technique principalement employée dans le domaine aéronautique, permet de détecter dans les matériaux composites (CFRP, nid d'abeilles) des défauts de type fissures, porosité<sup>12</sup>, délaminages et dommages suite à un impact

### II.10.10.Shearographie ;

#### II.10.10.1.Principe :

La shearographie est une méthode interférométrique utilisant la lumière laser comme source lumineuse. Le gradient du déplacement de la surface provoquée par la mise sous contraintes de la pièce est mesuré puis analysé et présenté sous forme d'une cartographie des déformations de la surface.

Cette cartographie est le résultat de la comparaison d'images obtenues par mesure des variations géométriques à la surface des échantillons sous test à différents intervalles de temps.



**Figure II.12:** Principe de shearographie [54]

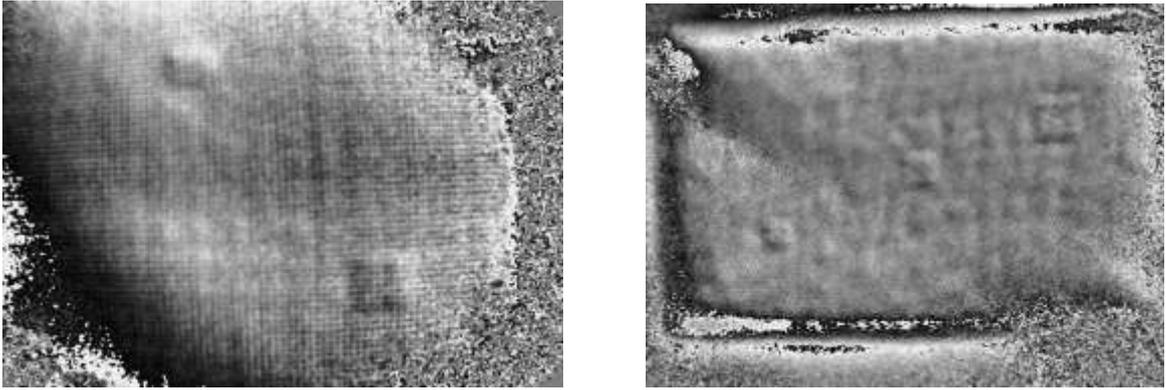
Les contraintes appliquées peuvent être thermiques, vibratoires ou pneumatiques (dépression) [51]

Cette méthode est sans contact et permet une mesure globale donc rapide de la surface analysée. Un système de contrôle shearographique comprend une caméra CCD, un laser (ou diode laser), un système optique permettant de réaliser un cisaillement du champ vu par la caméra et une unité de traitement des données.

### II.10.10.2. Shearographie par contraintes thermiques :

Pour détecter les défauts de façon optimale, la contrainte appliquée doit être correctement adaptée au type de contrôle.

En raison de la haute sensibilité de la shearographie, la charge appliquée est très petite. En appliquant une contrainte thermique par l'intermédiaire de lampes halogènes ou lampes flash, la variation de température de quelques degrés suffit pour provoquer des déformations de surface de l'ordre du micromètre. Ainsi, pour le contrôle de délaminages de structures composites monolithiques, il est conseillé l'utilisation de contraintes thermiques avec lampes halogènes. Dans le cadre d'un projet de développement industriel de l'IS, un contrôle par shearographie a été réalisé sur des plaques en matériau composite monolithique carbone / époxy et sur une structure en nid d'abeilles. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure ci-dessous.

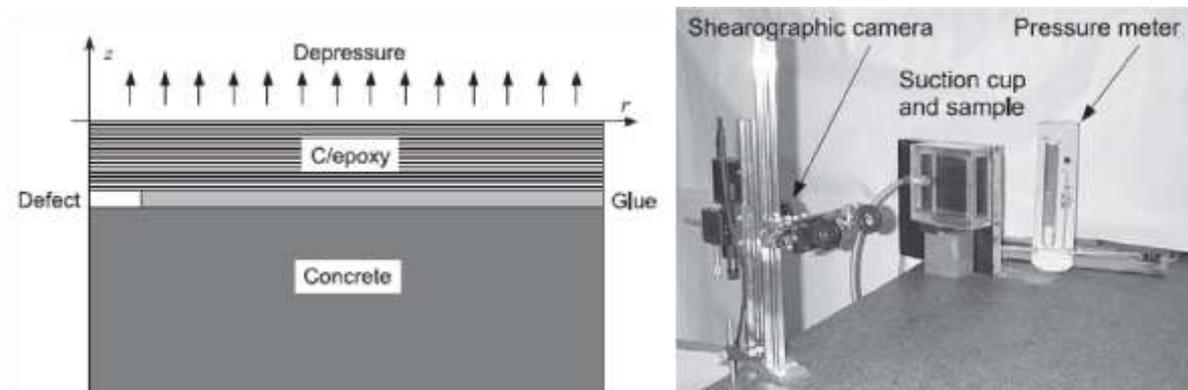


**Figure II.13 :** Contrôle shearographique d’une structure composite monolithique (gauche) et en nid d’abeille (droite) Shearographie par contrainte pneumatique (dépression) [55]

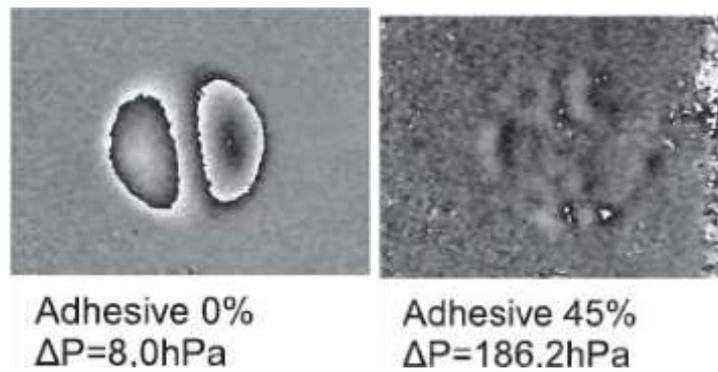
La shearographie par dépression permet de manière précise de détecter différents types de défauts dans les matériaux composites, notamment les délaminages.

La différence de pression entre l’air contenu dans les défauts et la contrainte à la surface du matériau crée une déformation. La dépression exercée est très faible (de l’ordre de quelques Pascal) et suffit pour pouvoir enregistrer les déformations engendrées à la surface.

La pression appliquée dépend des caractéristiques mécaniques du matériau et le rapport largeur/profondeur des défauts à détecter. Il est possible de prédire la dépression à appliquer grâce un modèle de calcul par élément-fini. Pratiquement la dépression est souvent exercée à l’aide d’une ventouse.



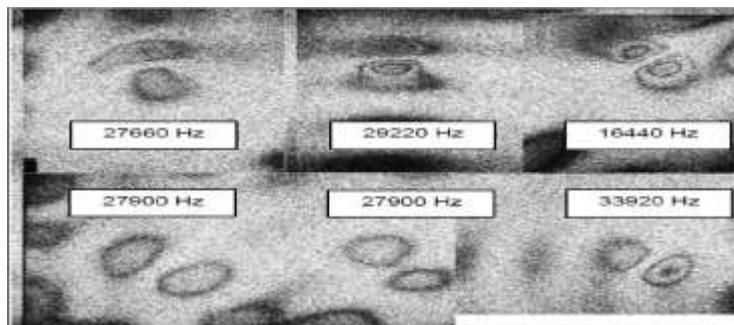
**Figure II.14 :** Principe de la Shearographie par dépression [55]



**Figure II.15 :** Shearographie par dépression pour des décollements de degré différents [55]

### II.10.10.3. Shearographie par excitation vibrationnelle :

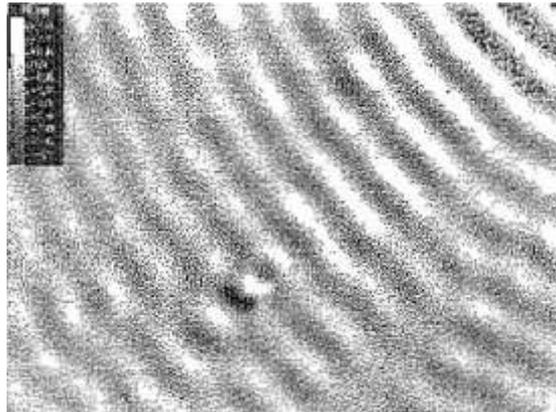
Dans cette configuration de contrôle, un transducteur piézoélectrique est attaché à l'arrière de la pièce. Il génère des ondes ultrasonores de fréquences différentes (comprise entre 0 et 100 kHz) provoquant la vibration de l'échantillon à une certaine fréquence. A cette fréquence d'excitation, les défauts tels que les délaminages dans une structure composite en carbone époxy monolithique sont détectables. En effet, les ondes guidées (onde de Lamb) sont très sensibles à la présence de défauts [56]



**Figure II.16 :** Cartographie d'un matériau composite CFRP obtenue par shearographie à excitation vibrationnelle [56]

Dans le cas général, les défauts apparaissent clairement sur l'interférogramme lorsque la fréquence d'excitation atteint la fréquence de résonance du défaut (beaucoup plus élevée que la fréquence de résonance de la pièce)

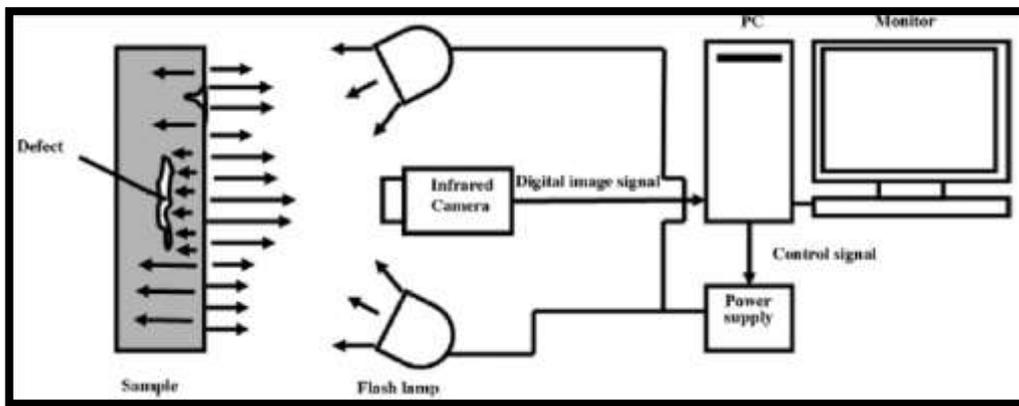
Cependant contrairement à l'excitation thermique ou dépressive, l'excitation vibrationnelle engendre deux états statiques de vibration de l'objet. L'onde de Lamb nominale peut être isolée à l'aide d'un filtre optique, le stroboscope, pour ne voir que l'interaction des ondes avec les défauts [57]



**Figure II.17 :** Cartographie d'un matériau composite stratifié obtenue par shearographie par excitation vibrationnelle[57]

**II.11.11.La thermographie :**

La thermographie infrarouge est basée sur la mesure du flux thermique ou rayonnement électromagnétique émis par une pièce dans l'infrarouge. Ce flux est directement proportionnel à la température de surface de la pièce au facteur d'émissivité près. Ainsi, à l'aide d'une caméra infrarouge, une représentation thermique de la pièce peut être reconstituée. La méthode thermographique la plus utilisée pour le contrôle de structures aéronautiques consiste à appliquer une impulsion thermique externe au matériau. Les défauts sont alors mis en évidence par l'étude de la propagation du flux thermique [58]



**Figure II.18 :** Schéma de montage de la thermographie pulsée [59]

**II.12.Les avantage des essais non destructifs :**

Les contributions apportées à l'industrie par les essais non destructifs peuvent être divisées en quatre catégories : accroissement de la productivité, de la durée d'utilisation, de la sécurité, et de l'identification des matériaux.

**II.12.1.Augmentation de la productivité et des bénéfices:**

Les essais non destructifs permettent :

- ❖ D'éviter le gaspillage de matériaux, de diminuer les rebuts et de mieux utiliser la matière première.
- ❖ D'éviter les divergences par rapport à la qualité standard, d'obtenir une qualité meilleure et uniforme et de satisfaire l'acheteur.
- ❖ D'éviter le gaspillage de temps d'usinage (temps qui ne sont jamais retrouvés).
- ❖ De diminuer les frais d'entretien.
- ❖ De diminuer les frais de production.
- ❖ De contrôler et d'améliorer les procédés de production (en décelant les causes de mauvais fonctionnement et en trouvant les traitements nécessaires).
- ❖ D'augmenter la récupération de matériaux (certains matériaux défectueux peuvent être utilisables).
- ❖ De guider les études et avant-projets.
- ❖ De localiser et déterminer les défauts.
- ❖ D'utiliser plus efficacement les équipements.
- ❖ De trouver les matériaux défectueux.
- ❖ De trouver les procédés corrects de production.

### **II.12.2. Augmentation de la durée d'utilisation:**

Les essais non destructifs permettent :

- ❖ De déterminer les régions de contraintes mécaniques.
- ❖ De déterminer les défauts dus à la fatigue mécaniques.
- ❖ D'éviter le mauvais fonctionnement d'un équipement vital.
- ❖ D'éliminer les ruptures d'équipement.
- ❖ De diminuer les frais d'entretien et de production.

### **II.12.3. Augmentation de la sécurité :**

Les essais non destructifs permettent d'éviter:

- ❖ Les accidents.
- ❖ Les pertes humaines.
- ❖ Les pertes matérielles.

### **II.12.4. Augmentation de l'identification des matériaux :**

Les essais non destructifs permettent de classer les matériaux et de différencier:

- ❖ Les compositions chimiques.
- ❖ Les traitements thermiques.
- ❖ Les propriétés métallurgiques.
- ❖ Les propriétés physiques.

### **II.13.Conclusion:**

Comme il existe plusieurs types d'essais et contrôles, l'utilité d'un essai ne peut pas être connue sans savoir le domaine d'application des autres essais, leurs avantages et leurs inconvénients et les comparer avec l'essai d'étude, ce qui peut distinguer son importance et son but d'existence ; ceux-ci nous oriente à choisir la méthode de contrôle la plus correspondante et la plus idéale pour nos besoins.